



XIENCAC
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

VIIELACAC
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Búzios - RJ - 2011

AVALIAÇÃO DO PROGRAMA *LIGHTOOL* SEGUNDO PROTOCOLOS DO RELATÓRIO TÉCNICO CIE 171:2006

Letícia Niero Moraes (1); Anderson Claro (2)

(1) Arquiteta, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, leticia@labcon.ufsc.br

(2) Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, ander@arq.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental, Cx Postal 470, Florianópolis-SC, 88040-970, Tel.: (48) 3721-9550

RESUMO

Para responder a uma necessidade crescente no domínio da simulação de iluminação, a Comissão Técnica CIE definiu recentemente um conjunto de casos de teste a ser utilizado para avaliar a precisão dos programas de simulação de iluminação, o Relatório CIE 171:2006. Estes casos de teste possuem a vantagem de evitar ou reduzir as incertezas na validação de dados de referência utilizando dados analíticos, ou pela aplicação de protocolos experimentais confiáveis. Este artigo apresenta exemplos de aplicações desses casos de teste para três programas de simulação: *LightTool*, *Relux* e *Dialux*, com o objetivo de avaliar a confiabilidade do programa *LightTool* em relação ao relatório e aos demais programas. São apresentadas aplicações de dois protocolos de teste, abrangendo diferentes aspectos do domínio de simulação de iluminação artificial. Os resultados das simulações são comparados entre os programas e com os valores de referência fornecidos pelo relatório. A comparação com os programas mostra a possível existência de uma diferença conceitual dos modelos de cálculo adotados. O *LightTool* apresentou nos testes, tanta confiabilidade quanto os outros dois programas. Os resultados dos testes nos permitiram tirar conclusões quanto à capacidade do programa *LightTool* para simular com confiabilidades os diferentes aspectos de propagação da iluminação, mostrando que o programa atende satisfatoriamente ao relatório CIE171:2006 para os protocolos testados.

Palavras-chave: iluminação artificial, simulação computacional, avaliação de programas

ABSTRACT

To answer to an increasing need in the lighting simulation domain, the CIE technical committee defined recently a set of test cases to be used for assessing the accuracy of lighting computer programs, the report CIE 171:2006. These test cases have the advantage of avoiding or reducing the uncertainties in the validation reference data by using simple analytical scenarios or by applying reliable experimental protocols. This paper presents examples of applications of these test cases for three simulation programs, *LightTool*, *Relux* and *Dialux*, in order to assess the reliability of the *LightTool* about the report and the other programs. It describes applications of two test protocols, covering different aspects of the simulation domain for artificial lighting. The simulation results are compared with the programs and the benchmarks provided by report. A comparison with the programs shows the possible existence of a conceptual difference calculation models adopted. The *LightTool* presented in tests so much reliability as the other two programs. The test results allowed us to draw conclusions regarding the program's ability to simulate *LightTool* reliabilities with different aspects of propagation of light, showing that the program meets the satisfaction of the report CIE171: 2006 for the protocols tested.

Keywords: artificial lighting, computer simulation, program evaluation

1. INTRODUÇÃO

O uso de programas de simulação de iluminação vem ganhando importância no campo da construção civil devido à crescente procura por ambientes energeticamente eficientes, auxiliando projetistas na escolha adequada de soluções arquitetônicas e técnicas. A busca por ambientes confortáveis e eficientes, reduzindo o consumo de energia através de um melhor aproveitamento da iluminação natural e a substituição da iluminação artificial, tem aumentado a procura por estes tipos de avaliações de desempenho.

Devido à esta demanda, um número crescente de programas de simulação de iluminação estão sendo propostos constantemente. Uma questão a ser analisada, sob esse aspecto, é a avaliação das informações produzidas. Existem poucas informações disponíveis sobre a precisão e a aplicabilidade de programas de simulação em iluminação, muitas vezes resultando em avaliações equivocadas da construção quando comparada com os objetivos do projeto original, como por exemplo, o consumo de energia e conforto dos ocupantes. Segundo Carvalho (2009), devido à grande quantidade de programas existentes e em desenvolvimento, que simulam a iluminação natural e artificial e suas diferentes abordagens de cálculo analítico, existe uma lacuna em relação a quanto esses programas representam adequadamente (ou com poucos desvios) o fenômeno físico real. Podem ocorrer imprecisões nos cálculos que se agravam com a necessidade de referências para a avaliação dos mesmos.

A Comissão Internacional de Iluminação (CIE, *Commission Internationale de l'Éclairage*) é uma entidade internacional independente, fundada em 1913 e sediada em Viena (Áustria). A CIE dedica-se ao intercâmbio de informações sobre todos os assuntos relacionados à ciência e à arte da iluminação e da luz. Em 2006 foi apresentado pela CIE um relatório com estudos de caso a serem testados em programas de simulação de iluminação, a fim de avaliar a confiabilidade dos resultados obtidos em simulações computacionais, o relatório CIE 171:2006 (CIE, 2006). A metodologia de teste baseia-se na comparação dos resultados da simulação do programa a ser avaliado com os dados de referência fornecidos pelo relatório, calculados analiticamente ou por medições experimentais em ambientes reais. Esta metodologia tem sido utilizada para avaliar a precisão da simulação de vários programas.

Dentro do Relatório Técnico da CIE 171:2006 são apresentados diversos protocolos, cada um com um objetivo. O documento é dividido em dois capítulos principais, apresentando os estudos de caso: “*Propostas Experimentais de Estudos de Caso*” e “*Estudos de Caso Propostos com Referências Analíticas*”. A descrição dos estudos de caso utilizados inclui a geometria, a fonte de luz, e um conjunto de valores a serem utilizados como referência para avaliar a precisão de uma simulação de iluminação. Estes valores de referência foram obtidos através de cálculos teóricos simples para os cenários analíticos ou através de medições em ambientes reais, nos casos experimentais. Baseado nesta abordagem, o relatório apresenta um conjunto de estudos de caso lidando com cenários de iluminação simples, onde um aspecto específico da propagação da luz é isolado, ou destacado de cada caso.

Este artigo compara os dados fornecidos pelo relatório técnico CIE com simulações no programa *LightTool*, buscando avaliar o seu desempenho. O *LightTool* é um programa de cálculo de iluminação integrada (natural + artificial), possuindo sua base de cálculo com base nos algoritmos do Modelo Vetorial Esférico, que avalia a iluminação natural e artificial por meio da troca de radiações entre superfícies opacas e difusas (CLARO,1998). O programa utiliza o mesmo algoritmo de cálculo para iluminação natural do programa APOLUX (CLARO, 1998), que já foi validado por Carvalho (2009) e Pereira (2008). Portanto, os protocolos utilizados neste trabalho referem-se a avaliação da simulação da iluminação artificial, uma vez que a validação da iluminação natural já foi realizada.

Foram utilizados dois protocolos, totalizando quatro casos de teste, cada um dedicado a um aspecto particular da iluminação artificial. Mais precisamente: o Protocolo 4, utilizado para verificar a consistência do algoritmo de cálculo da luz artificial a partir de arquivos fotométricos e a conservação do fluxo luminoso que deixa a luminária e atinge as superfícies do ambiente, através da comparação com estudos experimentais; e o Protocolo 5.8, utilizado para verificar a consistência da equação da radiosidade, que computa o acréscimo de luz nas superfícies em função das inter-reflexões luminosas, avaliando as inter reflexões no interior de um ambiente simples através da comparação com dados analíticos. Uma análise é realizada através da comparação programa *LightTool* a programas de simulação de iluminação, *Relux* e *Dialux*, onde os casos testes do Protocolo 4 foram simulados nos três programas.

2. OBJETIVO

Averiguar a confiabilidade do programa de simulação de iluminação *LightTool* quanto à simulação de iluminação artificial, segundo protocolos de validação selecionados do Relatório Técnico da CIE 171:2006.

3. MÉTODO

A metodologia baseia-se na comparação dos dados obtidos nas simulações com o programa *LightTool* com os valores de referência fornecidos pelo protocolo, e com os resultados das simulações com os programas *Relux* e *Dialux*. Foram utilizados quatro casos teste: o Protocolo 4.1 – *Cenário de Iluminação Artificial – parede cinza*; Protocolo 4.2 – *Cenário de Iluminação Artificial – Luminária opaca, parede cinza*; Protocolo 4.3 – *Cenário de Iluminação Artificial – Luminárias de refletor semi-especular, parede cinza* e o Protocolo 5.8 – *Componente Refletida Interna Calculada para Superfícies Difusas*. Uma descrição completa é dada para cada cenário, incluindo a geometria, as fontes de luz, os pontos de referência, e os dados de referência relacionados.

Primeiramente, foram construídos os modelos computacionais nos três programas, para cada caso teste, cada qual com suas características. Os modelos foram simulados e os dados de saída da simulação foram comparados aos dados de referência fornecidos pelo Relatório Técnico CIE, obtidos através de medições experimentais em cenários reais (Protocolo 4) ou através de cálculos analíticos (Protocolo 5.8).

3.1. Simulação computacional no programa *LightTool*

O *LightTool* é um programa de cálculo de iluminação integrada (natural + artificial) criado no LabCon – ARQ / UFSC utilizando o método criado por Claro (1998). A versão do programa pode ser baixada gratuitamente no site da empresa patrocinadora do projeto (www.lightgroup.com.br). O *LightTool* possui uma ferramenta própria de modelagem, não necessitando uma interface com outros programas. Os modelos gerados no programa são definidos parametricamente através de dimensões. As características dos materiais são inseridas no processo de criação do ambiente. Os cenários testes foram modelados no programa, de acordo com as especificações do Relatório Técnico CIE, conforme detalhado a seguir.

3.1.1 Protocolo 4- Avaliação da luz artificial: dados de referência experimentais

Os casos teste do relatório técnico CIE para o Protocolo 4 fornecem os dados de referência, consistindo em valores de iluminância global, obtidos em medições em ambientes reais.

Para este protocolo foram utilizados três casos experimentais referentes ao protocolo - 4.1, 4.2 e 4.3, cada um com variações das refletâncias das superfícies e diferentes características das luminárias. O cenário deste caso teste mede 6,78 m no sentido longitudinal e 6,72 m no sentido transversal, como mostra a Figura 1. A altura do teto é 3,24 m. Os pontos de medição são definidos em uma grade de 7x7, com metade do espaçamento nas bordas. O plano de medição está 0,80 m acima do nível do piso. Quatro luminárias são posicionadas em uma grade regular de 2 x 2 luminárias, com espaçamento de 3,39m no sentido longitudinal e 3,36m no sentido transversal. A mesma geometria é utilizada para os três casos, variando-se o tipo de fotometria das luminárias e a refletância das superfícies internas para cada um.

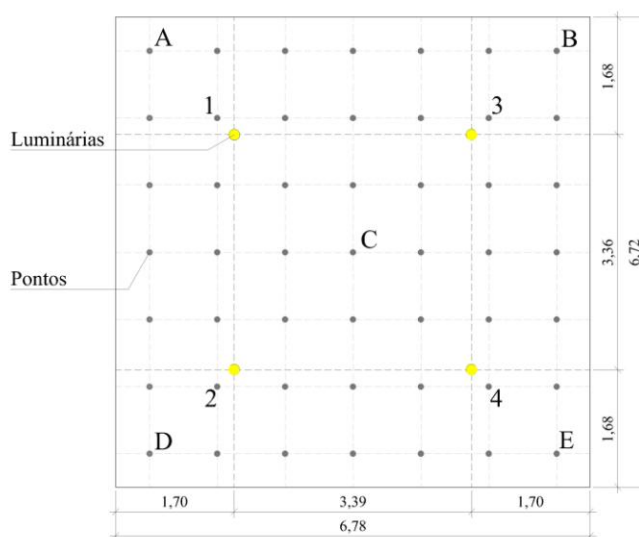


Figura 1. Planta do cenário com localização dos pontos de medição e luminárias

A Tabela 1 apresenta as refletâncias médias das superfícies internas do cenário para cada caso, fornecidas pelo relatório, com uma tolerância superior de medição, ou seja, um acréscimo no valor de refletância para cada superfície, devido a possíveis desvios de medição. Para os três protocolos, as

refletâncias são constantes no teto e no piso, sendo que a refletância das paredes variam, conforme a tabela 1.

Tabela 1. Refletâncias das superfícies internas

Superfície	Protocolo 4.1		Protocolo 4.2		Protocolo 4.3	
	Refletância média ρ	Refletância ρ - tolerância superior	Refletância média ρ	Refletância ρ - tolerância superior	Refletância média ρ	Refletância ρ - tolerância superior
Teto	0,70	+ 0,01	0,70	+ 0,01	0,70	+ 0,01
Piso	0,06	+ 0,01	0,06	+ 0,01	0,06	+ 0,01
Paredes	0,41	+ 0,02	0,52	+ 0,02	0,52	+ 0,02

O sistema de iluminação utiliza lâmpadas fluorescentes como fontes de luz, que variam para cada um dos três casos, assim como as refletâncias das superfícies internas. Para o Protocolo 4.1 é utilizada uma fonte pontual com lâmpada fluorescente compacta (32W Philips PL-T/840 / 4P), localizada a 3,14m de altura. Para o Protocolo 4.2, luminárias opacas (Opaline 450 milímetros, Cat. No. 2045T381 com uma lâmpada de 38W TC-DD, localizadas a 3,2m de altura. Para o Protocolo 4.3, luminárias de refletor semi-especular 600x600 milímetros quadrados, com três lampadas Philips New Genertaion TL – 18W, localizadas a 3,2m de altura. O protocolo fornece a mesma fotometria para as luminárias de cada caso teste, sendo que o fluxo luminosa de cada luminária é variável. A Tabela 2 mostra a localização das luminárias e o fluxo de saída.

Tabela 2. Localização e fluxo luminoso das luminárias

Luminárias	Coordenadas (m)		Protocolo 4.1	Protocolo 4.2	Protocolo 4.3
	X(m)	Y(m)	Fluxo(lm)	Fluxo(lm)	Fluxo(lm)
Luminária 1	1,695	1,68	2182	1850	4087,7
Luminária 2	1,695	5,04	2196	1830	4174,7
Luminária 3	5,085	1,68	2203	1870	4135,0
Luminária 4	5,085	5,04	2182	2110	4114,3

Os dados de fotometria para as lâmpadas são fornecidos pelo relatório no formato CIBSE TM14. Como o programa *LightTool* não utiliza este formato, foi necessária a transformação destas fotometrias para o formato IES, conforme recomendações de Teixeira (2003). Cada fotometria foi editada no bloco de notas do Windows, de acordo com os valores de referência das intensidades luminosas e ângulos contidas no Anexo A.1 do relatório CIE171:2006. O programa permite carregar arquivos digitais no formato IES de diferentes tipos de luminárias, sendo possível visualizar todo o conjunto de suas informações, assim como definir a geometria que será usada para sua visualização no ambiente.

As resoluções de cálculo utilizadas no *LightTool* foram: Grau de Refinamento Geométrico muito alto e Grau de Refinamento Visual alto. Foram geradas planilhas de resultados contendo os valores das iluminâncias globais (iluminâncias iniciais e a componente refletida) para cada ponto da malha de análise.

3.1.2 Protocolo 5.8 - Avaliação da componente refletida interna calculada para superfícies difusas

A Figura 2 mostra a geometria do estudo de caso, uma sala quadrada de dimensões 4m x 4m x 4m ($S_T = 96,00m^2$), com todas as superfícies sendo uniformemente difusas e espectralmente neutras. Uma fonte pontual de luz isotrópica é posicionada no centro do cômodo com um fluxo de saída (ϕ) de 10.000 lm.

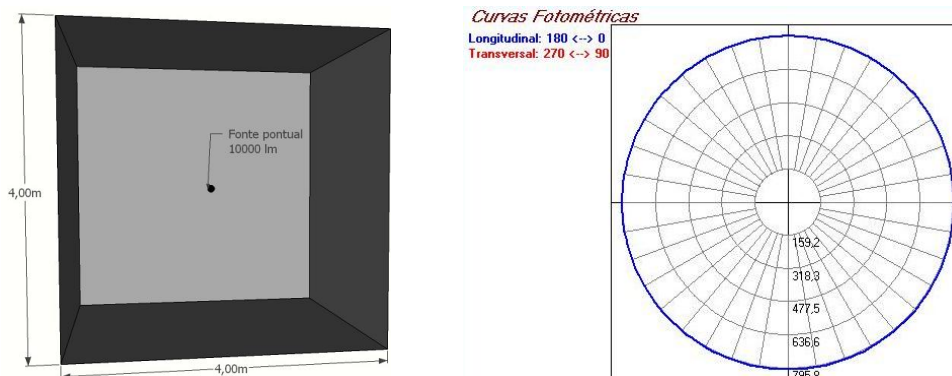


Figura 2. Geometria do cenário teste e fotometria da luminária pontual utilizada

Como no protocolo 4, os dados fotométricos fornecidos em formato CISBE TM14 pelo relatório CIE171: 2006 foram convertidos para o formato IES. O mesmo ambiente foi utilizado para a simulação dos casos testes, onde a refletância (ρ) é a mesma para toda a superfície interior, variando de 0% a 95%, ou seja, o ambiente foi simulado doze vezes, variando as refletâncias conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Variação da iluminância média indireta com a refletância média.

Refletância ρ	0,00	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95
E_{av} (lx)	0,00	5,48	11,6	26,0	44,6	69,4	104	156	243	417	937	1979

O *LightTool* inicia o procedimento de cálculo com o cálculo da visibilidade (fator de forma), associada fundamentalmente à geometria do ambiente. O programa oferece 5 graus de refinamento de visibilidade pré-definidos, utilizados conforme necessidade de detalhamento, que varia de **muito baixa** a **muito alta**. A próxima etapa é o cálculo da iluminação, que considera a radiosidade, um modelo de troca de energia através da radiação eletromagnética. Na versão do programa disponível para download gratuito, o usuário pode especificar entre 3 e 12 ciclos de radiosidade, que na prática já conduzem a uma convergência relativamente satisfatória para estudos práticos e rápidos. Neste estudo foram disponibilizados até 100 ciclos de radiosidade, para permitir uma avaliação mais precisa dos algoritmos e um comportamento mais preciso das reflexões internas.

3.2. Referências de dados

A análise quantitativa dos dados é realizada através das comparações dos resultados obtidos através das simulações computacionais com os dados fornecidos pelo relatório, para cada protocolo utilizado. Esta comparação consiste na análise da diferença dos valores obtidos através de gráficos e uma análise de desvio em relação aos valores de referência do protocolo.

3.2.1 Referência experimental – Protocolo 4

Os dados de referência fornecidos pelo relatório para o protocolo 4 são obtidos através de medições em ambientes reais, sendo apresentados através de limites superiores e inferiores de iluminância global (iluminância artificial e refletida) com base nas fontes de desvio estimadas nas medições e na descrição do cenário (calibração de sensores, posição da luminária, distribuição de saída do fluxo, dimensões da sala e refletância da superfície). Os valores de referência são apresentados no apêndice A do relatório CIE.

Os desvios entre os valores medidos experimentalmente no relatório técnico CIE e os valores obtidos através das simulações com o programa *LightTool*, foram estimados em relação à média dos limites inferior e superior de medição, conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Limites superior e inferior para iluminação pontos de medição com parede cinza – exemplo para o Protocolo 4.1

Valores de referência - CFL- paredes cinza							
Posição	Valores de iluminância (lux) nos pontos de medição						
	1	2	3	4	5	6	7
Limite superior global	91	107	115	118	116	107	93
Limite superior de medição	85	100	108	110	108	100	87
Simulação Linha 1	x	x	x	x	x	x	x
Limite inferior de medição	65	77	83	85	83	77	67
Limite inferior global	59	70	75	77	76	70	61

Para uma comparação mais precisa do algoritmo do programa *LightTool*, verificou-se analiticamente, para o protocolo 4.1, a iluminância inicial, que desconsidera as inter-reflexões no interior do ambiente, em 5 pontos. O relatório fornece o cálculo analítico através da equação 1:

$$E_{ini} = \frac{I}{d^2} \cdot \cos(anginc) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

E_{ini} iluminância inicial (lux);

I é a intensidade luminosa (cd);

d^2 é a distância entre a fonte e a superfície (m).

$\cos(anginc)$ é o cosseno do ângulo de incidência.

3.2.2 Referência analítica – Protocolo 5.8

Os valores de referência presentes no protocolo, para a comparação com os resultados da simulação no *LightTool*, foram obtidos analiticamente. De acordo com o relatório, no caso de um cômodo cúbico com uma refletância da superfície interna uniforme (ρ), a equação 2 pode ser usada para dar a média aproximada da iluminância indireta (refletida):

$$E_{av} = \frac{1}{S_T} \cdot \frac{\rho \cdot \phi}{1 - \rho}$$

Equação 2

Onde:

E_{av} é a iluminância indireta (lux);

S_T é a superfície total do cômodo (m²);

ρ é a refletância da superfície interna do cômodo;

ϕ é o fluxo luminoso direto entrando no cômodo (lm).

Os valores de referência são obtidos analiticamente através da equação 2, resultando em dados de comparação para os resultados obtidos nas simulações com o programa *LightTool*, para cada valor de refletância (Tabela 3).

Foram utilizadas inicialmente duas diferentes configurações de simulação: Resolução média com 40 ciclos de radiosidade (Grau de Refinamento Geométrico: MÉDIO e Grau de Refinamento Visual: MÉDIO), Resolução alta com 40 ciclos de radiosidade (Grau de Refinamento Geométrico: ALTO e Grau de Refinamento Visual: MUITO ALTO). Os valores de iluminância da componente refletida resultantes da simulação foram utilizados para o tratamento dos dados. Foram calculadas as médias ponderadas destes valores de iluminância, para cada valor de refletância das superfícies internas contidos neste estudo de caso – de 0 a 95%. A análise de desvios é realizada através das diferenças dos valores médios das iluminâncias para cada valor de refletância, em relação ao fornecido pelo relatório Técnico CIE (Tabela 3).

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os dados de referência calculados analiticamente ou através de medições experimentais, apresentados no relatório técnico CIE, foram comparados aos das simulações. Foram verificadas as concordâncias entre os valores das iluminâncias resultantes das simulações e os valores de referência, assim como foram estimados os desvios para cada caso, podendo-se averiguar a confiabilidade do programa. A comparação entre os resultados da simulação no programa *LightTool*, os dados de referência dos casos de teste CIE e os dois outros programas destacou as potencialidades e os limites do programa no que diz respeito aos aspectos de simulação de iluminação testados.

4.1. Protocolo 4 - Avaliação da luz artificial: dados de referência experimentais

Através das simulações foram obtidos os valores de iluminância global para cada ponto da malha de análise (Figura1). A Figura 3 apresenta os resultados de iluminância para cada ponto, obtidos nos programas *LightTool*, *Relux* e *Dialux*, em comparação aos dados de referência experimental do relatório CIE.

A análise dos gráficos da Figura 3 mostra que para o Protocolo 4.1, os programas *LightTool* e *Relux* tiveram um comportamento semelhante, tanto nos valores de iluminância quanto ao perfil da curva. Já o programa *Dialux* apresentou diferenças significativas em alguns pontos da malha, mas manteve um perfil de comportamento da curva semelhante aos demais programas. O gráfico de resultados para o Protocolo 4.2 mostra novamente a conformidade dos programas *LightTool* e *Relux* quanto aos valores encontrados para as iluminâncias na malha de análise, sendo muito próximos aos valores do limite inferior fornecidos pelo relatório técnico CIE. Percebe-se, assim como no Protocolo 4.1, que o programa *Dialux* apresenta novamente resultados diferentes aos dos outros dois programas. Para o Protocolo 4.3, percebe-se que os três programas tiveram um comportamento semelhante, não coincidindo totalmente com os limites estabelecidos pelo relatório técnico. Mais uma vez, percebe-se a proximidade das curvas dos programas *LightTool* e *Relux* e o distanciamento da curva referente ao programa *Dialux*.

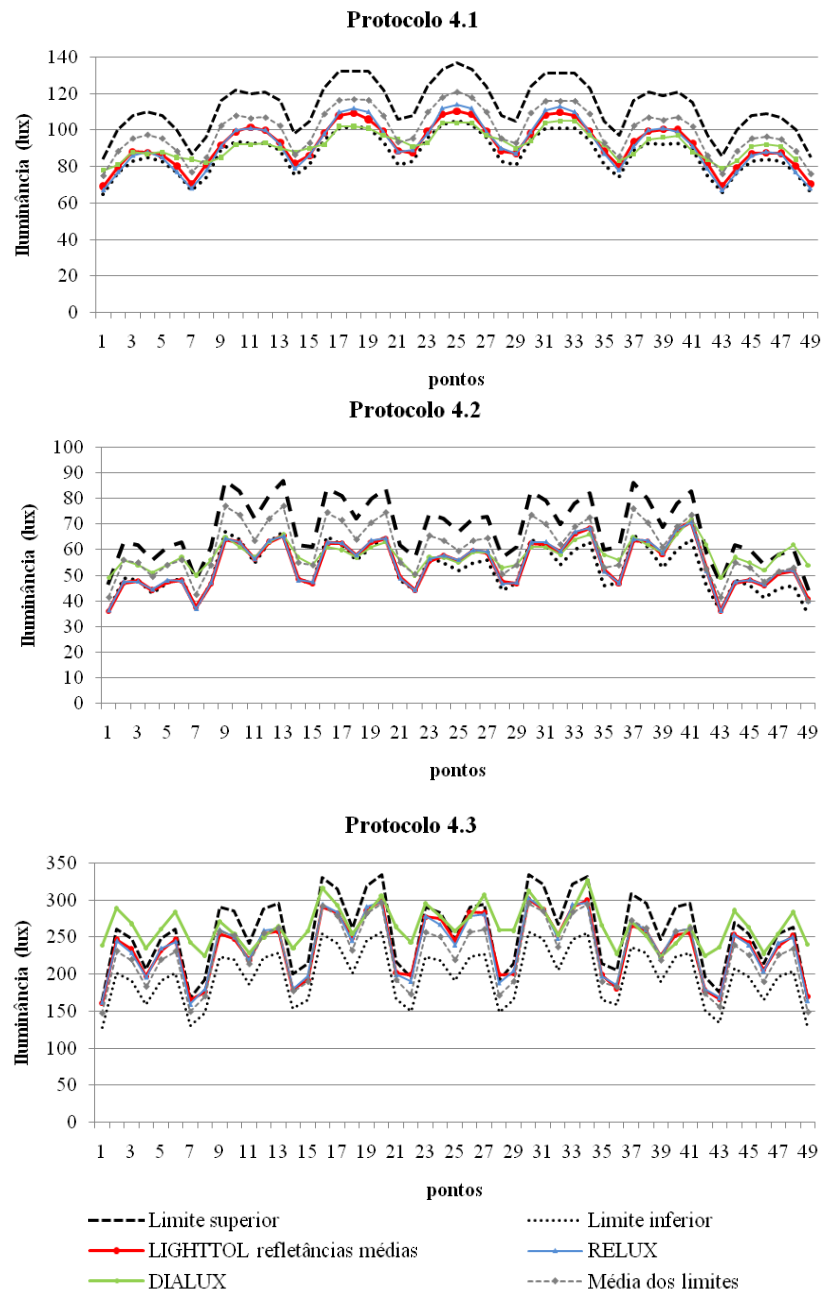


Figura 3. Resultados da comparação dos valores de iluminância obtidos para os pontos de análise

A Figura 4 mostra os desvios calculados para cada ponto da malha de análise, em relação aos valores fornecidos pelo relatório técnico CIE. Há uma boa concordância entre os resultados da simulação dos programas testados e a referência experimental. Para o caso 4.1 as iluminâncias calculadas estão dentro das margens de tolerância dos valores medidos, sendo que, para o *LightTool* e *Relux*, nenhum ponto ultrapassa os limites dos desvios. O *Dialux* apresentou 17 pontos fora dos limites de desvio. Para os casos 4.2 e 4.3 percebe-se uma maior discordância em relação aos limites estabelecidos pelo relatório CIE, fato que é verificado nos resultados das simulações com os três programas. O programa *LightTool* apresentou 11 pontos com valores fora dos limites de desvio para o protocolo 4.2 e 27 pontos para o protocolo 4.3. O programa *Relux* apresentou 12 pontos para o protocolo 4.2 e 24 pontos para o protocolo 4.3. Já o programa *Dialux* apresentou 13 pontos para o protocolo 4.2 e 29 pontos para o protocolo 4.3.

É importante ressaltar que a análise de desvios contida neste trabalho não é a mais precisa para a avaliação do desempenho de programas computacionais neste caso, uma vez que aplicada a valores de referência de iluminâncias muito baixos. Uma diferença de cerca de 10 lux, em termos de iluminação no ambiente, é insignificante, diferentemente da análise de desvio, onde uma diferença de 10 lux pode chegar a um desvio de mais de 10%.

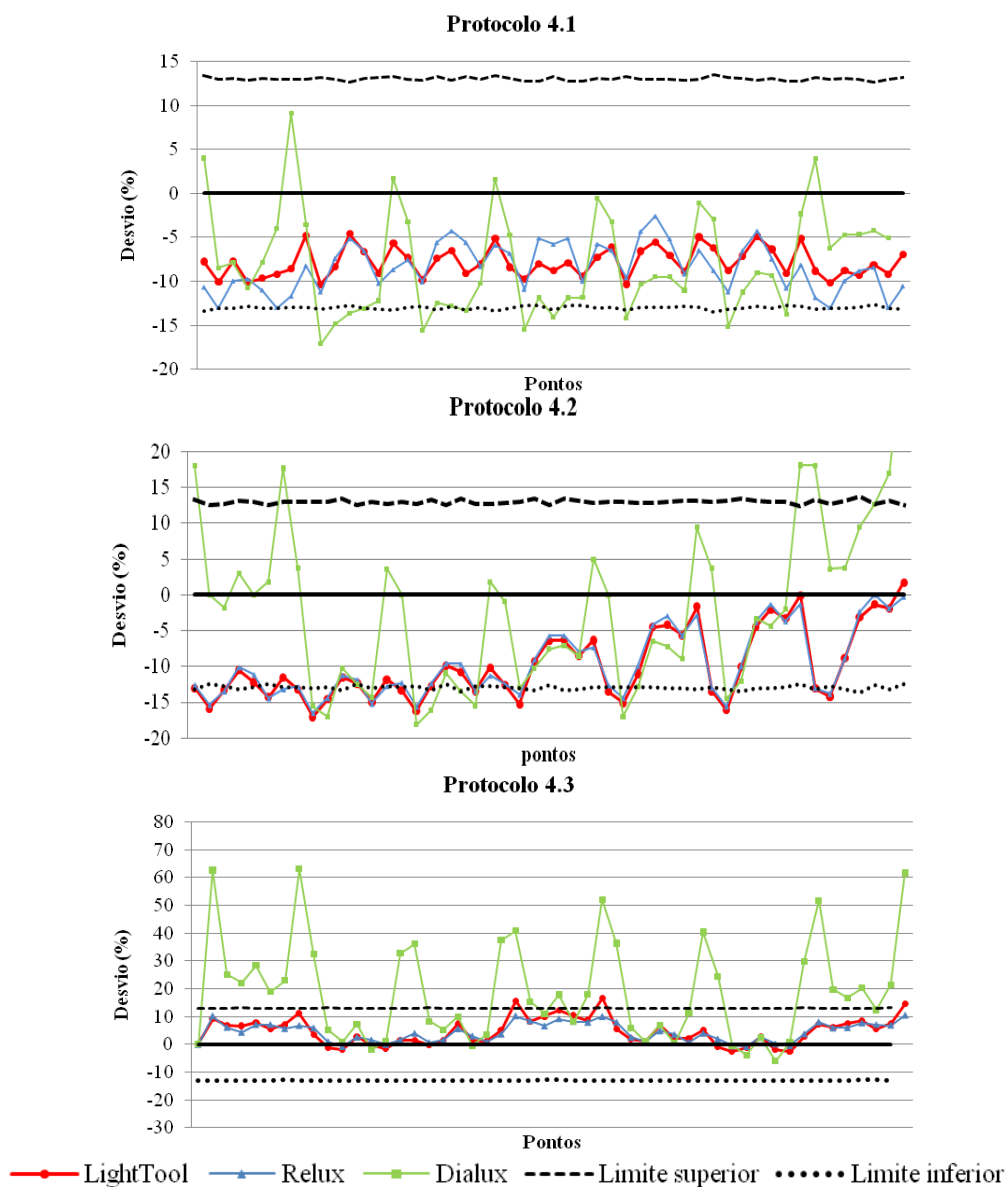


Figura 4. Resultados dos desvios calculados para cada ponto

Para tentar avaliar melhor as diferenças encontradas, foi calculada a iluminância inicial (proveniente apenas da luminária) pelo método analítico contido no relatório (Equação 1), utilizando a fotometria fornecida para as luminárias. O cálculo foi realizado apenas para o programa *LightTool*, para 5 pontos 1 (ver Figura 1), no protocolo 4.1. A comparação com o cálculo inicial do programa *LightTool* é apresentada na Tabela 5, revelando a proximidade nos valores resultantes do cálculo analítico e da simulação.

Tabela 5 – Iluminância inicial (Eini) de 5 pontos do ambiente do Protocolo 4.1, calculadas pelo método analítico do Relatório CIE e pelo programa *LightTool*, indicando o desvio do resultado (%)

PONTO	Eini Analítico (lux)	Eini LightTool (lux)	Desvio (%)
PONTO A	9,88	9,98	1,01
PONTO B	10,33	10,30	-0,29
PONTO C (CENTRAL)	20,70	21,07	1,64
PONTO D	10,09	10,07	-0,19
PONTO E	10,26	10,24	-0,19

Além do cálculo analítico, foram simuladas, nos três programas, as iluminâncias iniciais para os três protocolos. A Figura 5 mostra o resultado das simulações. Para o *LightTool* e o *Relux*, os valores de iluminância inicial são gerados automaticamente na simulação. Já no *Dialux*, o ambiente foi simulado atribuindo-se valores de refletância interna das superfícies igual a 0, desconsiderando-se assim as inter-reflexões no interior do ambiente. Os três programas foram compatíveis com os valores

de iluminância inicial no protocolo 4.1. Já para os protocolos 4.2 e 4.3 (neste mais acentuadamente) percebe-se um distanciamento da curva referente ao programa *Dialux*.

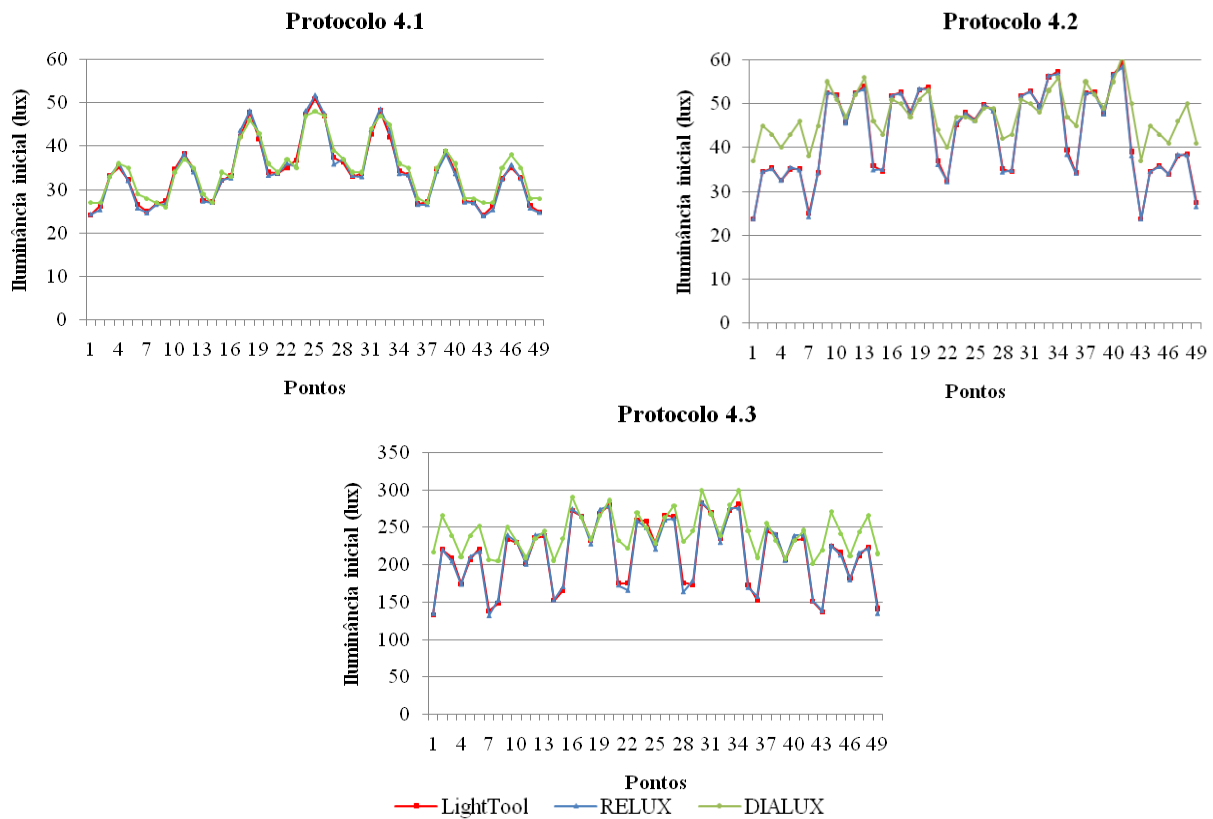


Figura 5. Resultados da comparação dos valores de iluminância inicial obtidos para os pontos de análise

4.2. Protocolo 5.8

Neste item são apresentados os resultados do programa *LighiTool* para três resoluções de cálculo, em comparação com a solução analítica fornecida pelo relatório CIE. Inicialmente foi utilizada uma configuração com 40 ciclos de radiosidade. Porém, no decorrer do estudo verificou-se desvios maiores nos valores de refletância de 90% e 95%. Assim, foi desenvolvida uma versão do programa com resoluções de cálculo com até 100 ciclos de radiosidade, onde estes valores de refletância mais elevados foram simulados.

A Tabela 6 mostra que o *LightTool* apresenta maiores diferenças de iluminação indireta para valores de refletância de 90 e 95%, quando simulados com uma configuração de radiosidade de 40 ciclos, chegando a no máximo 5,4%. Porém, é importante ressaltar que ambientes com 90% de refletância média praticamente não existem no mercado, sendo que os materiais mais claros (gesso, por exemplo) atingem cerca de 85%.

Tabela 6. Resultados e comparação de desvio

Refletância ρ	0,00	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95
<i>E analítica</i>	0,00	5,48	11,60	26,00	44,60	69,40	104,00	156,00	243,00	417,00	937,00	1979,00
Lighttool - Resolução média - 40 ciclos	0,00	5,47	11,34	26,00	44,55	69,28	103,90	155,78	242,21	414,97	930,92	1872,14
Diferença	0,00	-0,01	-0,26	0,00	-0,05	-0,12	-0,10	-0,22	-0,79	-2,03	-6,08	-106,86
Desvio (%)	0,00	-0,18	-2,24	0,00	-0,11	-0,17	-0,10	-0,14	-0,33	-0,49	-0,65	-5,40
Lighttool - Resolução alta - 40 ciclos	0,00	5,48	11,56	26,02	44,60	69,37	104,04	156,02	242,65	415,76	933,02	1876,94
Diferença	0,00	0,00	-0,04	0,02	0,00	-0,03	0,04	0,02	-0,35	-1,24	-3,98	-102,06
Desvio (%)	0,00	0,00	-0,34	0,08	0,00	-0,04	0,04	0,01	-0,14	-0,0	-0,42	-5,16
Lighttool - Resolução alta - 100 ciclos											934,9	1960,1
Diferença											-2,14	-18,90
Desvio (%)											-0,23	-0,96

A Figura 6 representa graficamente os resultados das comparações, que permitem concluir que diferentes graus de resolução de visibilidade geraram diferentes iluminâncias no plano de análise, todas dentro de uma margem de comparação aceitável. Tanto a resolução média quanto a resolução alta com 40 ciclos de radiosidade apresentaram desvios muito pequenos, praticamente todos menores que 1% (Tabela 6), indicando uma boa precisão do programa diante do relatório.

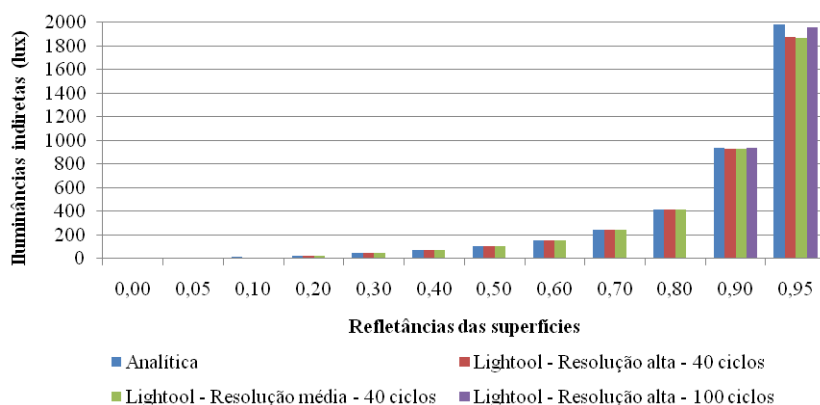


Figura 6. Resultados da comparação para as médias de iluminâncias indiretas

5. CONCLUSÕES

Para verificar a convergência entre os valores descritos no Relatório CIE 171:2006 e os simulados com o programa foram verificados diferentes aspectos da propagação da luz, como o algoritmo de cálculo da luz artificial, a conservação do fluxo luminoso e a consistência da equação da radiosidade do programa.

A verificação da consistência do algoritmo de cálculo da luz artificial e a conservação do fluxo luminoso (Protocolo 4), mostra que o programa apresenta uma boa precisão em geral. Apesar de a análise de desvios ter encontrado valores acima de 10% em alguns casos, deve-se lembrar que em termos de análise de iluminação, estes desvios tornam-se insignificantes, já que estas diferenças encontradas nos valores simulados são referentes à iluminância muito baixas.

A análise Protocolo 5.8, único do relatório técnico da CIE que permite avaliar a consistência da equação da radiosidade, computa o acréscimo de luz nas superfícies em função das inter-reflexões luminosas, mostrou que o programa *LighTool* atende plenamente às condições de conservação e distribuição do fluxo pela equação da radiosidade. Mesmo utilizando-se a resolução média com 40 ciclos de radiosidade, os resultados mostraram-se confiáveis, com desvios menores que 1% para os casos de refletância de até 90%. Refletâncias superiores a este valor dificilmente são consideradas em ambientes reais.

A comparação com os programas permite concluir que pode haver alguma diferença conceitual dos modelos de cálculo adotados, por um lado, pelo *Relux* e pelo *LighTool* (sempre bastante próximos) e, por outro, o *Dialux*, que resultou em valores sempre diferentes e distantes dos outros dois programas. O *LighTool* apresentou, nos testes, tanta confiabilidade quanto os outros dois programas, sendo que o algoritmo de cálculo do *LighTool* conduziu a resultados bastante próximos ao do *Relux*, inclusive no cálculo da iluminância inicial. Quanto às discrepâncias encontradas no Protocolo 4.3, os testes não permitiram concluir o motivo do por que os 3 programas terem apresentado desvios tão acentuados.

Os resultados dos testes nos permitiram tirar conclusões quanto à capacidade do programa *LighTool* para simular com a mesma confiabilidade de outros programas reconhecidos os diferentes aspectos de propagação da iluminação, mostrando que o programa atende satisfatoriamente ao relatório CIE171:2006 para os protocolos testados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARVALHO, Carolina Rocha. **Avaliação do Programa APOLUX Segundo Protocolos do Relatório CIE 171:2006 Referentes à Iluminação Natural**. Florianópolis, 26 de novembro de 2009, 149 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFSC, 2009.
- CIE STANDARD – COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE (2006). Technical Report. CIE 171:2006 “Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs”. France, 2006.
- CLARO, Anderson. “**Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade Aplicado à Iluminação Natural**.” Florianópolis. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, 1998.
- PEREIRA, Roberto Carlos. **Avaliação de ferramentas de simulação de iluminação natural por meio de mapeamento digital de iluminâncias da abóboda celeste e entorno**. Florianópolis, 25 de novembro de 2008, 184 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, 2008.
- TEIXEIRA, Wilson. Arquivos fotométricos digitais. Revista Lumière. São Paulo, 2003.